# 加速器的百年历程

朱雄伟
中国科学院高能物理研究所

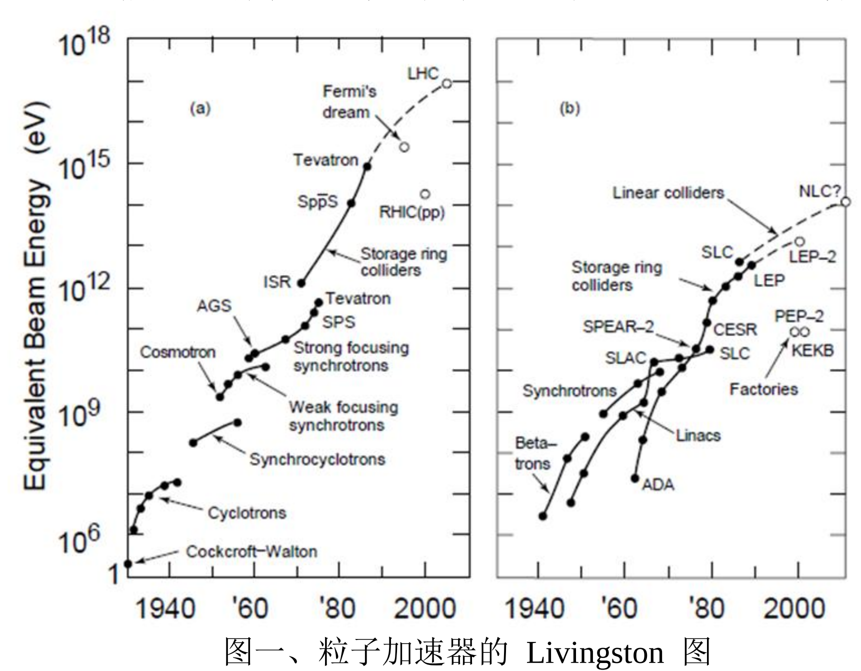


【摘要】本文分析讨论了加速器的百年历史， 从思想的萌芽、理论的突破与准备、技术的准备与储存、实验的成功、加速器的未来与展望等几个方面进行了论述。

关键词： 加速器， 电子， 质子， 重离子。

1. 思想的萌芽

加速器的历史可以追溯到上世纪二十年代【1,2】， 带电粒子加速这一思想与概念来自于原子散射， 加速器科学与技术历经百年沧桑。 大约 1918 年， 英国卢瑟福实验室的 Rutherford 运用氘氚粒子轰击原子核， 从而研究原子结构， 他需要有更高能量的带电粒子去产生原子反应。 这是加速带电粒子的最早的思想萌芽。 从那时起， 诞生了一门学科， 这就是加速器学科。 十九世纪麦克斯韦高度、系统总结了电磁理论，麦克斯韦方程组成为电磁理论的基础， 电磁场的源头就是带电粒子。 而带电粒子在电磁场中感受到洛伦兹力的作用， 所以很自然的， 人们想到用电磁场来加速带电粒子。 这就是加速器的思想萌芽。




图一、粒子加速器的 Livingston 图

从上世纪二十年代至今已达百年，如今加速器在全世界范围内广泛存在。高能加速器从最初的桌面实验装置发展为大型的科学工程， 占地面积高达上千平方公里。 各种加速器思想相互碰撞有力地推动了加速器科学的发展。 图一为最近的高能加速器的 Livingston 图表。

2. 理论的突破、准备

带电粒子的加速依赖于电磁场，带电粒子在电磁场中感受到洛仑兹

$F = q(E + V \times B)$。 因此带电粒子能量的改变为 $\frac{dW}{dt} = qE \cdot V$， 所以带电粒子与电场有能量交换，而与磁场没有能量交换。由麦克斯韦方程可知, 加速器最终运用电场来直接加速带电粒子， 静电场与射频电场都能用来加速带电粒子， 这对应于静电加速器与射频加速器。静电加速器属于早期的加速器，而现代加速器基本属于射频加速器，我们只讨论射频加速器。电磁场满足基本的麦克斯韦方程。各种加速结构中电磁场属于闭合场理论。 目前常用或研究的加速结构有金属结构、介质结构、等离子体腔体。 电磁波的一个主要特性是它的色散关系，电磁波的色散关系是它的频率和波数之间的函数关系$f(\omega, k) = 0$， 电磁波的相速 $v_p = \frac{\omega}{k}$， 群速 $v_g = \frac{d\omega}{dk}$。相速大于光速的电磁波属于快波，而相速小于光速的电磁波属于慢波。加速结构中电磁波的色散关系。

考虑一个带电粒子在电磁场中运动 （ $v = \beta c$ ）， 而电磁场由麦克斯韦方程所描述， 如果

（1）忽略运动电荷的辐射， $P_{rad} \approx 0$。
（2）带电粒子以近光速运动， $\beta \approx 1$。
（3）带电粒子运动区域没有其他自由电荷， $q = 0$。
（4)带电粒子以近似直线运动，没有其他的静电场、静磁场$E_{static} = 0, B_{static} = 0$。
（5）带电粒子运动介质没有折射率， $N = 1$。
（6）带电粒子在远场区域运动， 远离其他场源， $r/\lambda \gg 1$。

那么粒子没有获得加速。这就是普遍的加速定理。由以上普遍的加速定理， 可以演化出各种加速方法以及相应的加速器。

从最早的静电加速器到现代的共振加速器， 加速器的种类有静电加速器、回旋加速器、射频直线加速器、感应加速器、同步加速器、对撞机。 静电加速器由于高压技术的限制， 难以向高能方向发展。 回旋加速器属于弱聚焦加速器，也难以向高能发展。 稳相原理、强聚焦原理的出现 ， 使得射频直线加速器、同步加速器应运而生。 稳相原理使得粒子束团在相稳区振荡运动从而被捕获在相稳区。 强聚焦原理使得束团的横向捕获聚焦得以实现， 解决了设备庞大的问题。 不需要大型的磁铁技术。

## 3. 技术的准备与储存

加速器的发展伴随着技术的进步， 现代加速器集众多的高技术于一体。 笔者认为电磁波的开发极大推动了人类物质文明与精神文明的进步。 静场属于频率为零的电磁波。加速器是一门主要研究带电粒子与电磁场的相互作用的学问。人类已经开发的电磁波波谱从千米波到伽马射线【3】。 太赫兹波段在电磁波谱中占有特殊地位，太赫兹波段处于微波与红外光之间。 无论是经典力学向短波长逼近， 还是量子力学向长波长逼近， 在太赫兹尺度都遇到了困难， 笔者认为在太赫兹尺度可能需要诞生一门新的力学，进而研究太赫兹波段的物理现象。至今太赫兹波段的物理现象我们主要采用经典力学来分析解决问题。 加速器技术主要涉及高频技术、磁铁技术、电源技术、真空技术、束流测量技术、控制技术。

## 4. 实验的成功

加速器是一门实验科学， 强调的是 hands on 经验。 加速器理论的成功与否

最终看加速器能否建造成功。 下面一连串的记录记载了加速器的辉煌的历史进程 ( 部分统计 ):

1918 年， Rutherford 原子核散射实验.
1924 年， Ising, 时变场加速。
1930 年， Cockcroft, Walton, Van de Graaff, 高压倍增静电加速器.
1931 年， Lawrence, 回旋加速器。
1945 年， McMillan，Veksler, 论述稳相原理。
1946 年， W.Walkinshaw, 第一台电子直线加速器。
1947 年， SLAC, MarkI, 电子直线加速器。
1949 年， SLAC, MarkII, 电子直线加速器。
1950 年， E.Courant, M.Livingston, 强聚焦原理。
1951 年， SLAC, MarkIII, 电子直线加速器。
1961 年, AdA, 正负电子对撞机, Frascati, Italy.,
1969 年, ISR, 质子-质子对撞机， CERN, 瑞士。
1988 年, 北京正负电子对撞机，BEPC.。
2000 年， FLASH, DESY， 德国。
2010 年， LCLS, SLAC， 美国。
2011 年， SACLA, Spring 8，日本。
2015 年， LHC, 西欧核子中心， 瑞士。,
2018 年， LHCb, CERN， 瑞士。
. . . . . .

5. 加速器的未来与展望

常规加速器的发展前沿有高能量和高亮度两个发展方向。高能加速器是高能物理的有力工具。 物质的尺度越小， 所需要的粒子能量越高。 加速器的两个重要领域是未来光源（ FLS ）和未来对撞机 （ FCC ）。未来光源包括自由电子激光和衍射极限环， ERL ( 能量回收型直线加速器 )概念目前已修正为具有返航加速功能的直线加速器， 同时兼具光源功能。 未来对撞机主要包括强子对撞机、轻子对撞机、轻子强子对撞机、伽马对撞机等几个方面。 需要强调的是在质子加速器领域， 有质子加速器驱动的次临界反应堆和散裂中子源等。

在先进加速器概念（ Advanced Accelerator Concept ）领域， 新概念与新方法层出不穷。因为常规加速器有高压击穿问题， 笔者认为基于等离子体的加速器最具竞争力【4】。 加速结构应工作在真空状态下。在金属加速结构中，由于存在打火击穿问题，破坏了真空条件，所以难以建立很高的加速电场。在等离子体加速器中，加速电场建立存在于等离子体中，而等离子体本身处于离化状态，不存在打火击穿问题，所以可以建立高于常规金属加速结构几个数量级的加速电场。

参考文献：

1.S.Y.Lee, Accelerator Physics, World Scientific..

2. H. Wiedermann, Particle Accelerator Physics, World Scientific, 2016.
3.朱雄伟，张闯， 王书鸿， 陈森玉， 第四代光源-相干光源， 现代物理知识，2009。
4. E.Esarey, Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators, Review of Modern Physics, 81, 2009.

# 100th Anniversary of Accelerator

Xiongwei Zhu
Institute of High Energy Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing

[Abstract] In this paper, we analyze and disccuss the 100 years of history for the accelerators. From the several differential vision angles: the thought seeds, the theoretical breakthrough and preparation, technical preparation, experimental experiences and the future accelerator, we expound the 100 years of history for the accelerators systemly and completely.

Key words: Accelerator, electron, proton, heavy ion.